



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU (11) 2171554 (13) C2

(51) 7 H05H1/24, H05H1/26, H05H1/30,  
H05H1/46

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Статус: по данным на 13.11.2007 - прекратил действие

- (21) Заявка: 99110864/06  
(22) Дата подачи заявки: 1999.05.25  
(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 1999.05.25  
(31) Номер конвенционной заявки: 99106909  
(32) Дата подачи конвенционной заявки: 1999.04.07  
(33) Страна приоритета: RU  
(45) Опубликовано: 2001.07.27  
(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: 2046559 A, 20.10.1995. SU 1829879 A1, 27.08.1996. US 4370539 A, 25.01.1983. US 5210392 A, 11.05.1993. МИТИН Б.С. Порошковая металлургия и напыление покрытий. - М.: Металлургия, 1987, с.632 - 635. ЛИТВАК Л.Г. СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн: Сборник научных трудов. - Горький, 1988, с.141 - 142.

- (71) Заявитель(и):  
Корчагин Юрий  
Владимирович;  
Товарищество с  
ограниченной  
ответственностью  
"Комаров и Ко., Лтд."  
(72) Автор(ы): Корчагин  
Ю.В.  
(73) Патентообладатель(и):  
Корчагин Юрий  
Владимирович;  
Товарищество с  
ограниченной  
ответственностью  
"Комаров и Ко., Лтд."

Адрес для переписки:  
143080, Московская  
обл., пос. Лесной  
городок, ул.  
Фасадная, д.8/5,  
кв.16, Корчагину Ю.В.

## (54) СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Изобретение относится к плазменной технике, а точнее к средствам для генерирования плазмы с использованием внешних электромагнитных полей сверхвысокой частоты и предназначено для использования в маломощных и легко транспортируемых, создающих СВЧ-плазму установках, которые могут быть использованы в самых разных отраслях, например плазменная обработка поверхности материалов, экологическая очистка от вредных примесей выбросов промышленных и бытового характера, в медицинских и биологических приложениях и т.д. Сущность изобретения заключается в том, что возбуждают колебания на частоте, соответствующей резонансной частоте системы, образованной источником СВЧ-излучения (магнетроном) 1 и резонатором 3, определяют области пучности установившейся стоячей волны и направление колебаний электрического вектора в резонаторе, который соединяют с разрядной камерой 6, устанавливают между ними сильную связь, в разрядной камере исследуют распределение электромагнитного поля, фиксируя области пучности, размещают инициатор 4 в области пучности резонатора и разрядной камеры, при этом ориентируют его относительно направления колебаний электрического вектора в резонаторе, после чего возбуждают колебания на частоте, соответствующей резонансной частоте системы источник СВЧ-излучения - резонатор - инициатор - разрядная камера, увеличивая напряженность электромагнитного поля до величины, превышающей пробойную напряженность для газа, заполняющего разрядную камеру, иницируя тем самым разряд, и воздействием СВЧ-излучения генерируют плазму. Технический результат - обеспечение стабильности и устойчивости генерации разряда для формирования непрерывного потока плазмы в любой газовой среде. 2 с. и 12 з.п. ф-лы, 5 ил.

### ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Изобретение относится к плазменной технике, а точнее к средствам для генерирования плазмы с использованием внешних электромагнитных полей сверхвысокой частоты, и предназначено для использования в маломощных и легко транспортируемых, создающих СВЧ-плазму установках, которые могут быть использованы в самых разных отраслях, например, таких как плазменная обработка поверхности материалов, экологическая очистка от вредных примесей выбросов промышленных и бытового характера, в медицинских и биологических приложениях и т.д.

Важнейшей предпосылкой эффективного практического использования плазмы СВЧ-разряда является стабильность ее генерации при возможно более низких уровнях напряженности электрического поля волны как в импульсных, так и в непрерывных режимах генерации. Отсутствие стабильности генерации плазмы практически полностью закрывает возможности ее применения в технологиях, а работа при высоких уровнях электрических полей приводит к необходимости использования мощных и дорогостоящих СВЧ-установок, имеющих к тому же пониженный ресурс работы и работающих, как правило, в изолированных боксах, защищающих персонал от рентгеновских и СВЧ-излучений.

Как правило, для осуществления этих способов используются плазмотроны, содержащие генератор СВЧ, волновод для передачи мощности к области где образуется и поддерживается плазма [Порошковая металлургия и напыление покрытий/Под ред. д. т.н. проф. Б.С. Митина.- М.: Металлургия, 1987, с. 631-635; патент США N 4370539, МКИ<sup>6</sup> в 23 К 9/16, НКИ 219/121PW, заяв. 07.10.80, опуб. 25.10.83; патент США N 5210392, МКИ<sup>6</sup> в 23 К 9/00, НКИ 219/125.52, заяв. 07.11.90, опуб. 11.05.93].

В качестве такой области может быть использованы вакуумная камера, резонатор или просто трубка, пересекающая волновод.

Подобные установки требуют специальных средств для инициации плазменного разряда, например понижение давления газа до пробойного, сближение электродов, внешняя подача искры в зону образования плазмы или непосредственное замыкание электродов. Все эти средства позволяют получить многократную инициацию, но использование их приводит к быстрому разрушению электродов.

Горение плазмы в таких установках неустойчиво, в том случае, если она погаснет, для ее поджига нужна новая внешняя инициация разряда.

Кроме того, большинство таких устройств громоздки, и для их использования необходимо наличие таких средств, как вакуумная система, силовая установка для установления высокой напряженности СВЧ, а также средства защиты от СВЧ-излучения, что значительно усложняет использование, особенно для таких областей, как медицина, ювелирное дело и т.п.

Известен способ генерации плазмы, заключающийся в том, что с помощью электромагнитной волны СВЧ-диапазона в газовой среде создают инициированный разряд и генерируют плазму. Стабильная генерация плазмы в газовой среде при воздействии на нее электромагнитной СВЧ-волной происходит при превышении напряженности электрического поля волны порога зажигания самостоятельного разряда (Сборник научных трудов/Под ред. Л.Г. Литвака. СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн.- Горький, 1988, с. 141-142).

Для реализации этого способа в области плазмообразования размещают инициатор. Использование инициатора в несколько раз понижает порог генерации плазмы в зависимости от давления газа. Вместе с тем пространственно-временная стабильность воспроизведения СВЧ-разряда во многих случаях оказывается весьма неудовлетворительной. Это нежелательное свойство инициированного разряда особенно ярко проявляется при понижении напряженности электрического поля СВЧ-излучения и препятствует практическому использованию плазмы разряда с характеристиками, находящимися в области неустойчивой генерации плазмы.

Известен способ генерации плазмы, заключающийся в том, что в газовой среде с помощью электромагнитной волны СВЧ-диапазона создают инициированный разряд, генерирующий плазму, после создания разряда фиксируют полученную структуру разряда, выделяют периодически повторяющийся элемент структуры и размещают в область плазмообразования инициатор, геометрические параметры и форма которого идентичны периодически повторяющемуся элементу структуры разряда при его фиксации.

Для осуществления способа использовано устройство, содержащее СВЧ-излучатель, заполненную газом разрядную камеру и размещенный в ней инициатор, форма и геометрические параметры которого подобраны идентичными элементам структуры разряда [патент РФ N 2046559, МКИ<sup>6</sup> H 05 N 1/46, заяв. 30.12.92, публ. 20.10.95. БИ N 29].

Этот способ позволяет достаточно хорошо понизить порог пробоя, но если давление в газоразрядной камере порядка или выше атмосферного, требуется очень высокая напряженность электрического поля и соответственно очень большая подводимая мощность для инициации разряда в газе при высоком давлении.

Кроме того, каждый раз при изменении используемого газа или его рабочего давления необходимо менять конфигурацию инициатора, что значительно усложняет его практическое использование.

Задачей настоящего изобретения является обеспечение стабильности и устойчивости генерации разряда для формирования непрерывного потока плазмы в любой газовой среде путем автоматического возобновления инициации плазмы при любом давлении газа и использовании маломощных источников СВЧ-излучения.

Поставленная задача решается тем, что в известном способе генерации плазмы, заключающемся в иницировании разряда в газовой среде с помощью электромагнитной волны СВЧ-диапазона, используют маломощный источник СВЧ-излучения, напряженность электромагнитного поля которого повышают, для чего используют объемный резонатор, устанавливая сильную связь между источником СВЧ-излучения и резонатором, возбуждают колебания на частоте, соответствующей резонансной частоте системы, образованной источником СВЧ-излучения и резонатором, определяют области пучности установившейся стоячей волны и направление колебаний электрического вектора в резонаторе, который соединяют с разрядной камерой, устанавливают между ними сильную связь, в разрядной камере исследуют распределение электромагнитного поля, фиксируя области пучности, размещают инициатор в области пучности резонатора и разрядной камеры, при этом ориентируют его относительно направления колебаний электрического вектора в резонаторе, после чего возбуждают колебания на частоте, соответствующей резонансной частоте системы источник СВЧ-излучения - резонатор - инициатор - разрядная камера, увеличивая напряженность электромагнитного поля до величины, превышающей пробойную напряженность для газа, заполняющего разрядную камеру, иницируя тем самым разряд, и воздействием СВЧ-излучения генерируют плазму.

Кроме того, поставленная задача решается тем, что устройство для осуществления способа генерации плазмы, содержащее источник СВЧ-излучения, заполненную газом разрядную камеру и размещенный в ней инициатор, выполненный из токопроводящего материала, дополнено объемным резонатором, а инициатор установлен одновременно в полостях разрядной камеры и резонатора, при этом конец инициатора, расположенный в разрядной камере, размещен в области пучности, установившейся внутри разрядной камеры стоячей волны, а другой - помещен внутри резонатора в область пучности, установившейся в нем стоячей волны, а в качестве источника СВЧ-излучения использован СВЧ-магнетрон, рабочая частота которого соответствует резонансной частоте объемного резонатора, при этом излучающий элемент СВЧ-магнетрона расположен внутри объемного резонатора.

Оптимальное увеличение напряженности электрического поля может быть получено, если конец инициатора, находящийся в резонаторе, ориентирован параллельно направлению колебаний электрического вектора.

При этом инициатор может быть выполнен так, что конец инициатора, находящийся в резонаторе, либо соединен, либо не соединен с его проводящей поверхностью, во втором случае диаметр его как минимум в 2 раза больше диаметра конца инициатора, находящегося в разрядной камере, а длина его выбрана из соотношения

$$L = n \lambda / 2 + \lambda / 4,$$

где  $L$  - общая длина инициатора;

$\lambda$  - длина волны СВЧ-излучения в свободном пространстве;

$n = 0, 1, 2, \dots$

Форма инициатора может быть практически любой, но для упрощения изготовления инициатор может быть выполнен прямолинейным или изогнутым, например, в виде U-образной петли связи, при этом в области пучности, установившейся внутри резонатора стоячей волны параллельно электрическому

вектору, расположен участок петли связи, соединяющий параллельные ее части, и его длина равна  $\lambda / 4$ .

Инициатор может быть выполнен в виде двух перпендикулярно соединенных прямолинейных отрезков, и длина его отрезка, размещенного внутри резонатора параллельно электрическому вектору, равна  $\lambda / 4$ .

Для использования устройства, например в качестве средства для плазменного нанесения покрытий, например на поверхность режущего инструмента, инициатор может быть выполнен в виде трубопровода, и конец его, находящийся в резонаторе, выведен из него и подключен к системе подачи газа.

Для формирования струи плазмы конец выполненного в виде трубопровода инициатора, размещенный внутри разрядной камеры, может быть снабжен соплом из тугоплавкого материала и/или надета трубка из диэлектрического материала с высокой температурой плавления и низкими потерями энергии на СВЧ, например из кварца.

Для упрощения конструкции разрядная камера может быть выполнена в виде цилиндра, коаксиального с частью инициатора, расположенной в ней.

Сопоставительный анализ показал, что заявляемое решение отличается от прототипа тем, что возбуждают колебания на частоте, соответствующей

резонансной частоте системы, образованной источником СВЧ-излучения и резонатором, определяют области пучности установившейся стоячей волны и направление колебаний электрического вектора в резонаторе, который соединяют с разрядной камерой, устанавливают между ними сильную связь, в разрядной камере исследуют распределение электромагнитного поля, фиксируя области пучности, размещают инициатор в области пучности резонатора и разрядной камеры, при этом ориентируют его относительно направления колебаний электрического вектора в резонаторе.

А в устройстве в качестве источника СВЧ-излучения используется СВЧ-магнетрон, и инициатор расположен одновременно в полостях резонатора и разрядной камеры, что позволяет сделать вывод о соответствии критерию "новизна".

Сущность изобретения заключается в следующем.

Как известно, для инициации разряда требуется значительно большая напряженность электрического поля, иногда на несколько порядков, чем для поддержания горения разряда, и поэтому обычно для генерации плазмы используются довольно мощные источники СВЧ-излучения.

Если же использовать маломощный источник СВЧ-излучения, например СВЧ-магнетрон, то на этапе, предшествующем инициации разряда, нужно поднять напряженность до необходимого уровня. Для этого установку нужно дополнить накопителем энергии в диапазоне СВЧ, в качестве которого может быть использован объемный резонатор.

Однако в этом случае возникает проблема настройки резонатора и источника СВЧ-излучения на одну и ту же резонансную частоту.

Известны методы настройки и стабилизации частоты магнетрона полым резонатором, при этом в резонансной системе магнетрона появляются дополнительные резонансные состояния при любом характере связи анодного блока магнетрона с резонатором [Самсонов Д.В. Основы расчета и конструирования магнетронов. - М.: Советское радио, 1974, с. 167-194].

При этом в соответствии с принципом "минимального рассеяния" колебания системы "магнетрон - резонатор" возбуждаются на той частоте, на которой достигается наибольшее отношение запасенной энергии к общей энергии потерь за период, то есть на частоте, на которой добротность системы максимальна. Так как добротность собственной резонансной системы магнетрона много меньше добротности объемного резонатора, колебания будут возбуждаться на резонансной частоте системы, образованной магнетроном и резонатором. При этом, конечно, должна быть обеспечена "близость" этой частоты к собственной рабочей частоте магнетрона. Степень этой близости зависит от конкретного типа использованного магнетрона и степени связи его с резонатором.

Это означает, что если магнетрон сильно связан с объемным резонатором, и их собственные резонансные частоты с точностью порядка нескольких (не более 10%) совпадают, колебания будут возбуждаться на резонансной частоте системы без использования каких-либо механических элементов настройки частоты.

Для понижения порога генерации плазмы и снижения уровня мощности в области плазмообразования размещают инициатор, который используют также для обеспечения сильной связи в системе СВЧ-магнетрон - резонатор и разрядная камера. Для этого его устанавливают одновременно в полостях резонатора и разрядной камеры.

Сильная связь в системе СВЧ-магнетрон-резонатор может быть установлена, например, если излучающий элемент СВЧ-магнетрона будет размещен в резонаторе.

Этот режим работы системы может поддерживаться только в том случае, если будет обеспечена высокая добротность всей системы: магнетрон - объемный резонатор - разрядная камера в целом, для чего необходимо исключить какие-либо потери энергии из системы (например на излучение во внешнее пространство), за исключением неизбежных потерь из-за конечной проводимости стенок резонатора на этапе накопления энергии.

В случае обеспечения всех этих условий внутри объемного резонатора начинается накопление энергии и образуется стоячая волна, имеющая максимум и минимум напряженности электрического поля, пространственное распределение которых зависит от конкретного типа объемного резонатора (цилиндрический, коаксиальный, прямоугольный и т.д.) и типа возбуждаемых колебаний.

При этом напряженность электрического поля в местах расположения максимумов (так называемых "пучностей") значительно превышает напряженность поля, которую развивает магнетрон при излучении в свободном пространстве. Для высокодобротных резонаторов усиление напряженности поля может достигать очень больших величин, порядка 100 и более.

В обычных схемах использования объемных резонаторов для СВЧ-пробоя после достижения пробойной напряженности начинается газовый разряд, который распространяется на весь объем резонатора.

Расположение инициатора в полостях резонатора и разрядной камеры позволяет исключить излучение из разрядной камеры во внешнее пространство на предразрядной стадии и обеспечить сильную связь между резонатором и разрядной камерой, в результате чего внутри разрядной камеры устанавливается своя стоячая волна.

Многочисленные эксперименты показали, что если конец инициатора, расположенный в разрядной камере, попадает в область пучности образовавшейся в ней стоячей волны, то происходит разряд вблизи конца инициатора, то есть там, где неоднородность поля максимальная.

Пространственное расположение пучностей электрического поля внутри разрядной камеры определяется формой и размерами разрядной камеры.

Так как конец инициатора, находящийся внутри резонатора расположен в области высокой напряженности поля, необходимо предпринять специальные меры для недопущения возникновения разряда вблизи этого конца инициатора. Для этого можно, например, диаметр конца инициатора, находящегося внутри резонатора, увеличить как минимум вдвое по сравнению с диаметром конца инициатора, находящегося в разрядной камере.

Увеличение диаметра позволяет понизить градиент поля вблизи поверхности инициатора и увеличить пропорционально напряженность поля, необходимую для пробоя газа внутри резонатора, т.е. повысить электрическую прочность резонатора.

После инициации разряд локализуется вблизи конца инициатора и не распространяется на другие области разрядной камеры или резонатора.

Наличие инициатора и разрядной камеры несколько меняет собственную резонансную частоту системы магнетрон - объемный резонатор, но так как практически отсутствует излучение из системы, добротность системы, образованной магнетроном, резонатором, инициатором и разрядной камерой, остается высокой.

СВЧ-магнетрон "самотастируется" на частоту, соответствующую резонансной частоте системы магнетрон - резонатор - инициатор - разрядная камера. Так как установлена сильная связь между СВЧ-магнетроном и резонатором, с одной стороны, и резонатором и разрядной камерой, с другой стороны, излучаемая энергия эффективно передается в зону горения плазмы.

После возбуждения разряда образовавшаяся плазма начинает интенсивно поглощать энергию, в результате чего добротность всей системы резко падает, энергетически более выгодным для магнетрона становятся колебания на своей рабочей частоте, магнетрон перестраивается на эту частоту, и дальнейшее излучение энергии происходит на этой частоте.

При этом, если в силу каких-либо причин разряд погаснет, добротность всей системы через очень короткое время восстановится, магнетрон перестроится, произойдет новое накопление энергии и сразу же появится разряд. Промежуток времени для возобновления разряда так мал ( $\sim 10^{-6}$  с), что не влияет на стабильность работы устройства в целом, практически автоматически происходит инициация разряда, что позволяет получить устойчивый самонивелирующийся плазменный разряд, при этом он может быть получен в воздухе при атмосферном давлении и не требует СВЧ-генератора высокого уровня мощности.

Для локализации разряда во внешнем по отношению к резонатору объеме, каковым является заполненная газом разрядная камера, в резонатор в область пучности электрического поля параллельно электрическому вектору размещен инициатор, второй конец которого выведен в разрядную камеру.

Такое расположение инициатора позволяет понизить порог пробоя и добиться инициации разряда вблизи конца инициатора, находящегося в разрядной камере.

Работа устройства для реализации способа поясняется чертежами, где на фиг. 1 - вариант устройства, когда инициатор выполнен в виде прямолинейного

проводника; на фиг. 2 - вариант устройства, когда инициатор выполнен в виде U-образной петли связи; на фиг. 3 - вариант устройства, когда инициатор изогнут в виде двух перпендикулярно соединенных прямолинейных отрезков; на фиг. 4 - вариант устройства, когда разрядная камера установлена коаксиально с концом инициатора, находящегося в ней; на фиг. 5 - вариант устройства, когда конец инициатора, находящийся в резонаторе, не соединен с его проводящей поверхностью, а диаметр его как минимум в 2 раза больше диаметра конца инициатора, находящегося в разрядной камере.

Устройство содержит СВЧ-магнетрон 1, излучающий элемент 2 которого размещен в полости объемного резонатора 3, в его полости установлен также инициатор 4, один конец которого 5 находится в разрядной камере 6 и на него надето сопло 7 и трубка 8 из диэлектрического материала с высокой температурой плавления и низкими потерями энергии на СВЧ-излучении, другой конец инициатора 9 выведен из полости резонатора и подсоединен к системе подачи газа,  $d_2$  и  $d_1$  - диаметры концов инициатора, расположенные соответственно в резонаторе 3 и разрядной камере 6 (фиг. 5).

Варианты осуществления изобретения

Работает устройство следующим образом.

После подачи напряжения питания на магнетрон 1 за очень короткое время ( $\sim 10^{-8}$  с) происходит установление частоты, соответствующей резонансной частоте системы магнетрон 1 - резонатор 3 - инициатор 4 - разрядная камера 6.

Далее происходит накопление энергии в течение  $\sim 10^{-6}$  с до достижения пробойной напряженности. Вблизи конца 5 инициатора 4, находящегося в разрядной камере 6, зажигается разряд, энергия СВЧ, излучаемая источником излучения 2 магнетрона 1, поглощается образовавшейся плазмой. Сопло 7 и диэлектрическая трубка 8 вместе с системой подачи газа формируют плазменную струю. В случае если разряд погаснет, процесс инициации автоматически повторяется.

Так как инициатор выполняет одновременно роль элемента, обеспечивающего сильную связь между резонатором и разрядной камерой, его размеры должны обеспечивать оптимальные условия передачи энергии в зону горения разряда после инициации. Многочисленные эксперименты показали, что наилучшие результаты достигаются, если длина инициатора выбрана из соотношения

$$L = n \lambda / 2 + \lambda / 4 \quad (1),$$

где

$L$  - общая длина инициатора;

$\lambda$  - длина волны СВЧ-излучения в свободном пространстве;

$n$  - 1, 2, 3...

При этом инициатор может быть выполнен в виде прямолинейного проводника, ориентированного параллельно электрическому вектору.

Так как расположение пучностей электрического поля внутри разрядной камеры зависит от формы и размеров разрядной камеры и в общем случае не совпадает с месторасположением конца инициатора, для разрядной камеры произвольной формы необходима подгонка длины инициатора, что для прямолинейного инициатора может вступить в противоречие с требованием оптимальной длины  $L$ .

Наилучшим вариантом является тот, в котором инициатор выполнен в виде U-образной петли связи или изогнут в виде двух перпендикулярно соединенных прямолинейных отрезков, при этом длина его отрезка, расположенного внутри резонатора параллельно электрическому вектору, равна  $\lambda / 4$ .

Оптимальные условия передачи энергии достигаются, если длина участка инициатора, находящегося в пучности электрического поля резонатора параллельно электрическому вектору, составит  $\lambda / 4$ .

При использовании устройства для ионизации, нагрева и вывода во внешнюю среду потока плазмы в виде плазменной струи металлический инициатор может быть выполнен в виде трубопровода, при этом его конец, электрически соединенный с поверхностью резонатора, выведен через стенку резонатора и подключен к системе подачи газа.

Для того чтобы задать скорость и форму струи плазмы на конце инициатора, находящемся в разрядной камере, может быть установлено сопло из тугоплавкого металла, которое одновременно предупреждает разрушение конца инициатора образующейся высокотемпературной плазмой.

Для того чтобы сформировать струю плазмы, на него может быть надета трубка из диэлектрического материала с высокой температурой плавления и низкими потерями энергии на СВЧ-излучении, например из кварца. Такая трубка может быть размещена на этом конце и в том варианте, когда на конце инициатора надето сопло.

Проблема тепловых нагрузок на стенки диэлектрической трубки со стороны плазменной струи может быть решена стандартными способами, например, закручиванием плазменной струи вокруг своей оси, внешним обдувом трубки и другими.

Промышленная применимость.

В обычно используемых цилиндрических резонаторах, возбуждаемых на моде колебаний  $TM_{010}$ , напряженность электрического поля в центре резонатора согласно [Мак-Доналд А. СВЧ пробой в газах. - М.: Мир, 1969, с. 167] составляет

$$E_0 = \sqrt{P_0 Q / \eta \omega_0} \quad (2),$$

где  $P_0$  - мощность излучения СВЧ-магнетрона;

$Q$  - добротность резонатора;

$\omega_0$  - угловая частота СВЧ-излучения, а

$$\eta = 0,27 \cdot \epsilon_0 \cdot V \quad (3),$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м - диэлектрическая проницаемость в вакууме;

$V$  - объем резонатора, который обычно выбирается как  $V \sim \lambda^3$ .

где  $\lambda$  - длина волны СВЧ-излучения в свободном пространстве.

Используя формулу (2) для расчета, можно подобрать объемный резонатор с относительно невысокой добротностью ( $Q$ ) и при этом достичь довольно высокой напряженности в центре резонатора.

Например, при  $P_0 = 1$  кВт,  $\omega_0 / 2\pi = 2,45$  ГГц,  $V = 1$  л,  $Q = 10^3$ , напряженность электрического поля  $E_0 \sim 160$  кВ/см. Для примера пробойная напряженность для воздуха при атмосферном давлении составляет около 30 кВ/см.

Пример конкретного использования.

Использовался магнетрон с блоком питания от бытовых СВЧ-печей, имеющий мощность  $P = 800$  Вт и частоту  $f = \omega_0 / 2\pi = 2,45$  ГГц, это позволило

при  $\lambda = 12$  см использовать резонатор, изготовленный, например, из меди, объемом  $V = 0,7$  л.

Разрядная камера была выполнена в виде цилиндра, коаксиального с расположенным в нем концом инициатора с молибденовым соплом и диэлектрической трубкой из кварца. В качестве рабочего газа использовался воздух при атмосферном давлении.

Температура образовавшейся в такой конфигурации плазменной струи достигала  $4500^\circ\text{C}$ . При этом в течение 2 ч работы устройства эрозии инициатора не наблюдалось.

Устройство отличается высокой стабильностью в работе, инициация разряда в случае гашения плазмы происходит автоматически при небольшой потребляемой мощности. Такое устройство может работать от обычной бытовой электросети.

Кроме того, устройство отличается компактностью и простотой конструкции, в нем отсутствуют какие-либо механически перемещаемые детали.

Все это позволяет реализовать способ, используя устройство во многих отраслях, например для сварки, резки любых металлов, даже таких, как вольфрам, для нанесения покрытий из тугоплавких материалов, а компактность и малогабаритность устройства позволяют применять его в таких отраслях, как медицина, стоматология, ювелирное дело.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ генерации плазмы, заключающийся в иницировании разряда в газовой среде с помощью электромагнитной волны СВЧ-диапазона, отличающийся тем, что используют маломощный источник СВЧ-излучения, напряженность электромагнитного поля которого повышают, для чего используют объемный резонатор, устанавливают сильную связь между источником СВЧ-излучения и резонатором, возбуждают колебания на частоте, соответствующей резонансной частоте системы, образованной источником СВЧ-излучения и резонатором, определяют области пучности установившейся стоячей волны и направление колебаний электрического вектора в резонаторе, который соединяют с разрядной камерой, устанавливают между ними сильную связь, в разрядной камере исследуют распределение электромагнитного поля, фиксируя области пучности, размещают инициатор в области пучности резонатора и разрядной камеры, при этом ориентируют его относительно направления колебаний электрического вектора в резонаторе, после чего возбуждают колебания на частоте, соответствующей резонансной частоте системы; источник СВЧ-излучения - резонатор - инициатор - разрядная камера, увеличивая напряженность электромагнитного поля до величины, превышающей пробойную напряженность для газа, заполняющего разрядную камеру, иницируя тем самым разряд, и воздействием СВЧ-излучения генерируют плазму.

2. Устройство для осуществления способа генерации плазмы по п. 1, содержащее источник СВЧ-излучения, заполненную газом разрядную камеру, размещенный в ней инициатор, выполненный из токопроводящего материала, отличающееся тем, что устройство дополнено объемным резонатором, а инициатор установлен одновременно в полостях разрядной камеры и резонатора, при этом конец инициатора, расположенный в разрядной камере, размещен в области пучности, установившейся внутри разрядной камеры стоячей волны, а другой помещен внутри резонатора в область пучности установившейся в нем стоячей волны, а в качестве источника СВЧ-излучения использован СВЧ-магнетрон, рабочая частота которого соответствует резонансной частоте объемного резонатора, при этом излучающий элемент СВЧ-магнетрона расположен внутри объемного резонатора.

3. Устройство по п. 2, отличающееся тем, что конец инициатора, находящийся в резонаторе, электрически соединен с проводящей поверхностью резонатора.

4. Устройство по п. 2, отличающееся тем, что конец инициатора, находящийся в резонаторе, не соединен с его проводящей поверхностью, а диаметр его, как минимум, в 2 раза больше диаметра конца инициатора, находящегося в разрядной камере.

5. Устройство по любому из пп. 2 - 4, отличающееся тем, что длина инициатора выбрана из соотношения

$$L = n\lambda/2 + \lambda/4,$$

где  $L$  - общая длина инициатора;

$\lambda$  - длина волны СВЧ-излучения в свободном пространстве;

$n = 0, 1, 2, \dots$

6. Устройство по любому из пп.2 - 5, отличающееся тем, что инициатор выполнен прямолинейным.
7. Устройство по любому из пп.2 - 5, отличающееся тем, что инициатор выполнен изогнутым.
8. Устройство по любому из пп.2 - 5 и 7, отличающееся тем, что инициатор выполнен в виде U-образной петли связи, при этом в области пучности установившейся внутри резонатора стоячей волны параллельно электрическому вектору расположен участок петли связи, соединяющий параллельные ее части, и его длина равна  $\lambda/4$ .
9. Устройство по любому из пп.2 - 5 и 7, отличающееся тем, что инициатор изогнут в виде двух перпендикулярно соединенных прямолинейных отрезков, при этом длина его отрезка, расположенного внутри резонатора параллельно электрическому вектору, равна  $\lambda/4$ .
10. Устройство по любому из пп.2 - 9, отличающееся тем, что инициатор выполнен в виде трубопровода и конец его, находящийся в резонаторе, выведен из него и подключен к системе подачи газа.
11. Устройство по п.10, отличающееся тем, что конец инициатора, размещенный внутри разрядной камеры, снабжен соплом из тугоплавкого материала.
12. Устройство по п.10 или 11, отличающееся тем, что на конец инициатора, размещенный внутри разрядной камеры, надета трубка из диэлектрического материала с высокой температурой плавления и низкими потерями энергии на СВЧ.
13. Устройство по п.12, отличающееся тем, что трубка, надетая на размещенный внутри разрядной камеры конец инициатора, выполнена из кварца.
14. Устройство по любому из пп.2 - 12, отличающееся тем, что разрядная камера выполнена в виде цилиндра, коаксиального с частью инициатора, расположенной в ней.

Приоритет по пунктам:

25.05.99 по пп.1, 2, 4, 7;

07.04.99 по пп.3, 5, 6, 8 - 14.

---

## ИЗВЕЩЕНИЯ К ПАТЕНТУ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

---

Код изменения правового статуса

ММ4А - Досрочное прекращение действия патентов РФ из-за неуплаты в установленный срок пошлин за поддержание патента в силе

Дата публикации бюллетеня

2002.12.10

Номер бюллетеня

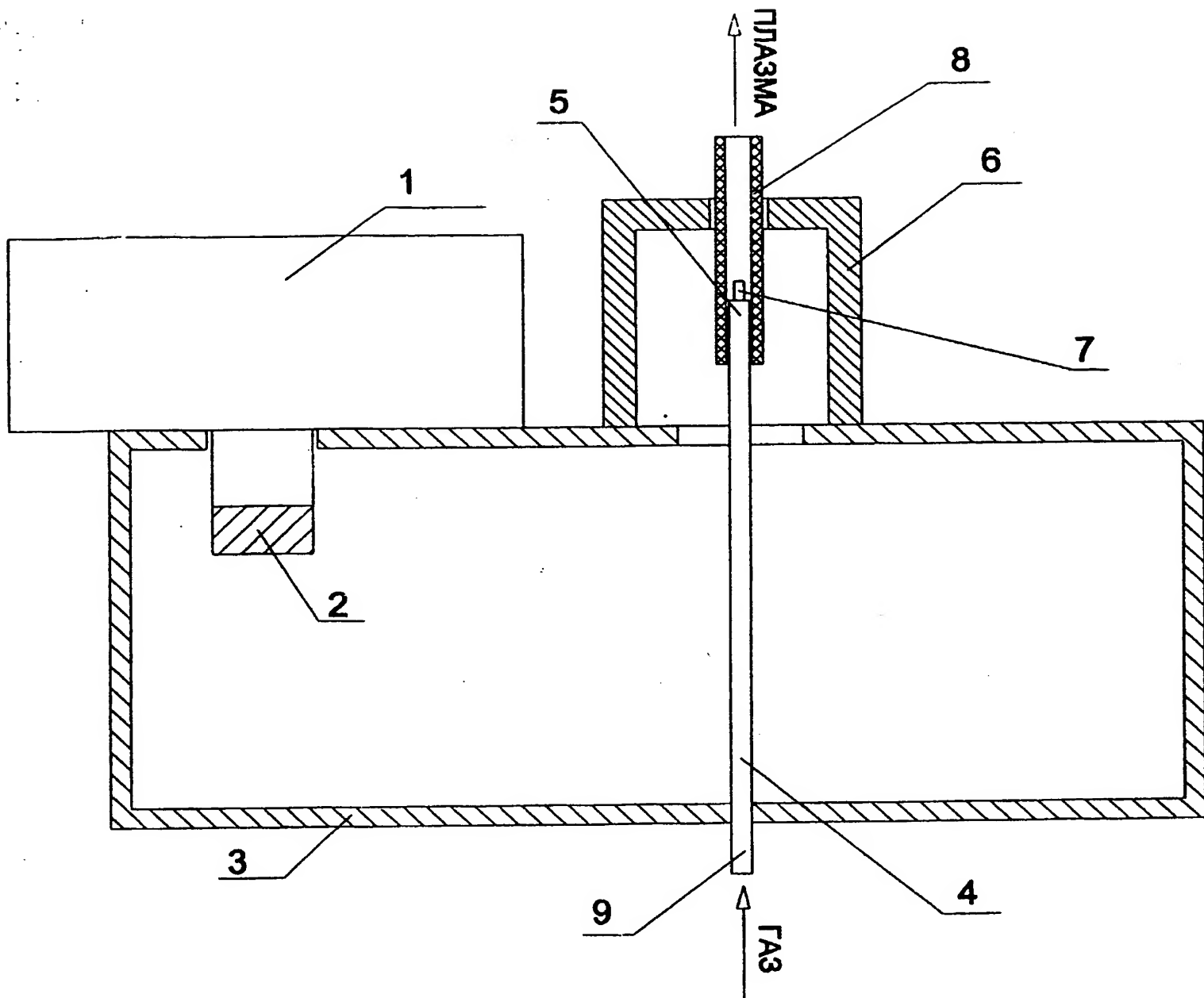
34/2002

Дата прекращения действия патента

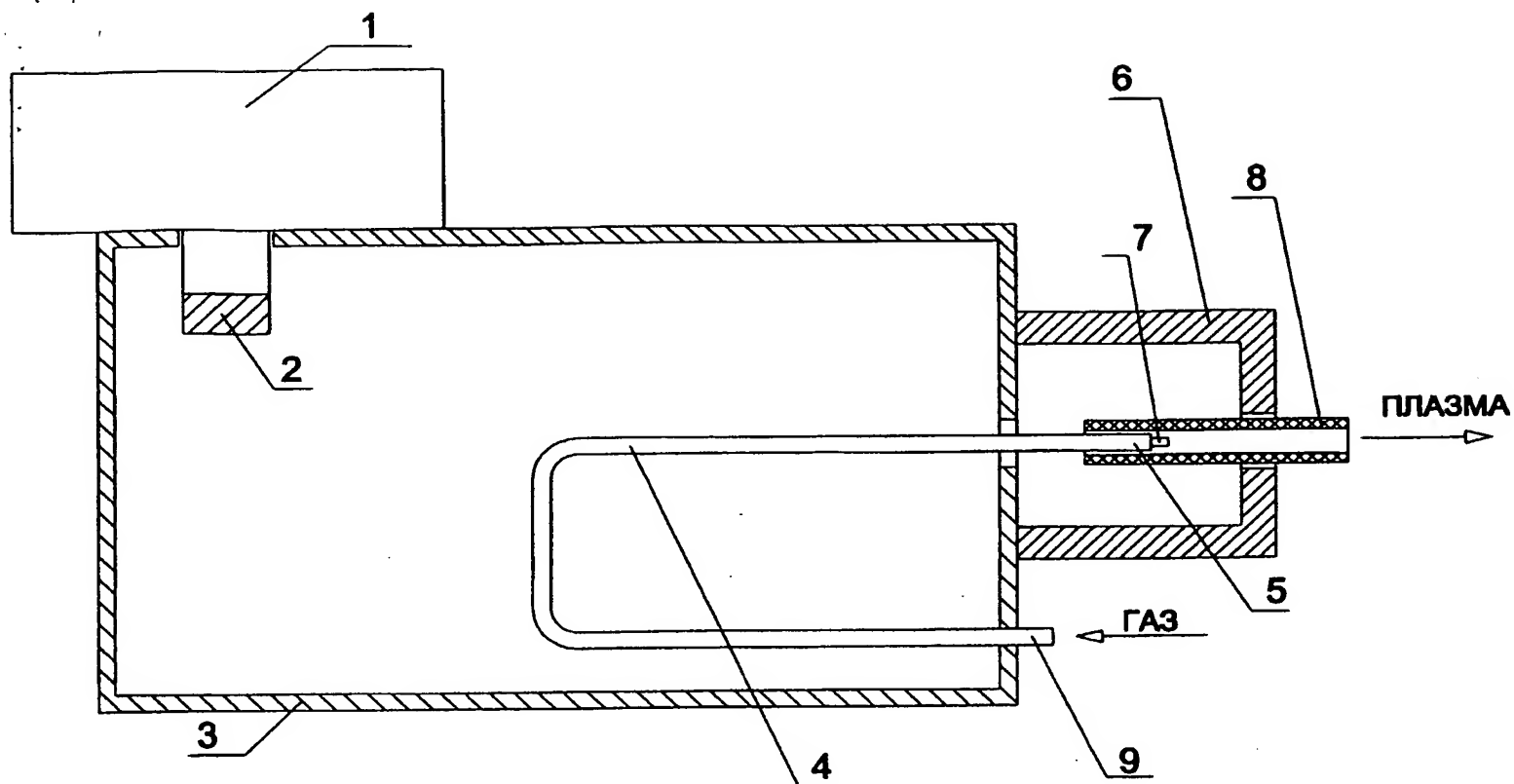
2001.05.26

## РИСУНКИ

Рисунок 1, Рисунок 2, Рисунок 3, Рисунок 4, Рисунок 5

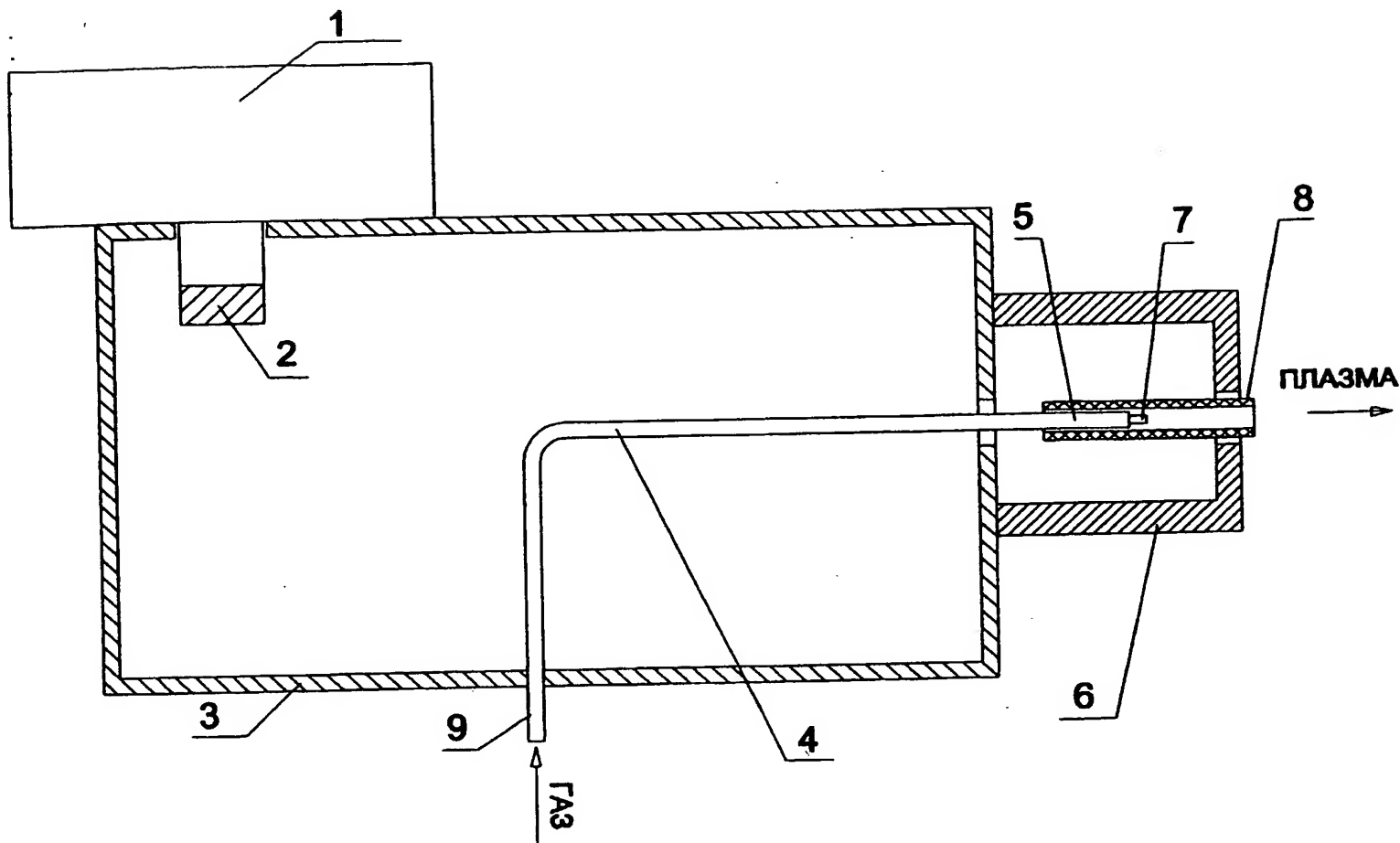


Фиг.1

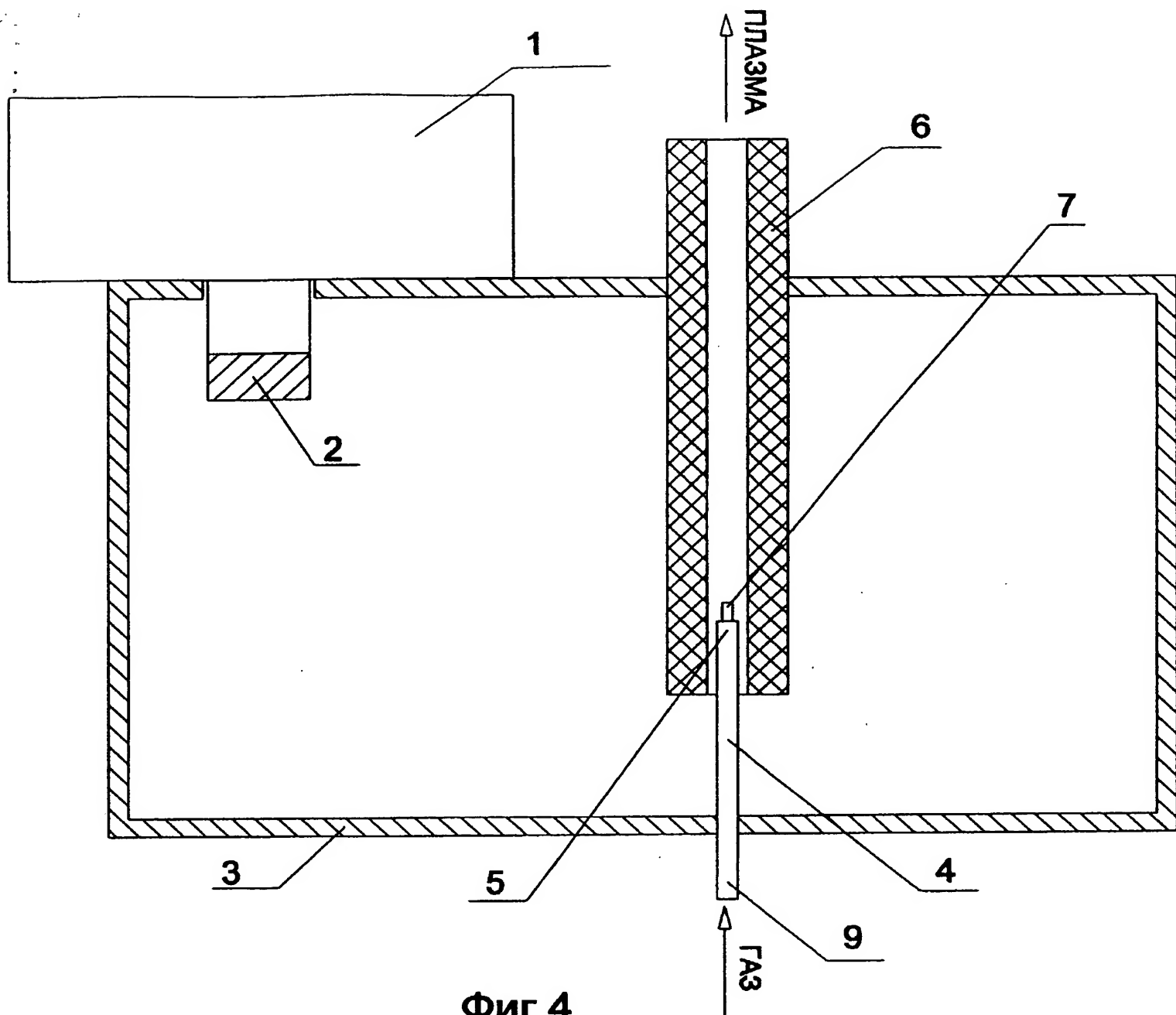


Фиг.2





Фиг.3





(19)RU(11)2171554(13)C2  
(51)7 H05H1/24, H05H1/26, H05H1/30, H05H1/46

FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY, PATENTS AND TRADEMARKS

(12) PATENT DISCLOSURE

**Status: terminated, as of 13.11.2007**

(21) Application: 99110864/06  
(22) Application Date: 1999.05.25  
(24) Patent inception date: 1999.05.25  
(31) Number of convention application: 99106909  
(32) Date of convention application: 1999.04.07  
(33) Country of priority: RU  
(45) Published on: 2001.07.27  
(56) List of documents referred to in the search report: 2046559 A, 20.10.1995. SU 1829879 A1, 27.08.1996. US 4370539 A, 25.01.1983. US 5210392 A, 11.05.1993. B.S. Mitin, Powder Metallurgy and Coating Deposition, Metallurgy, Moscow, 1987, p. 632-635. A.G. Litvak, High-Pressure Microwave Discharge in Beams of Electromagnetic Waves. Coll. papers, Gorky, 1988, p. 141-142.  
(71) Applicant(s): Yuri Vladimirovich Korchagin, Limited Liability Company "Komarov and Co. Ltd."  
(72) Author(s): Yu.V. Korchagin  
(73) Patent owner(s): Yuri Vladimirovich Korchagin, Limited Liability Company "Komarov and Co. Ltd."

Address for service: Yu.V. Korchagin, Apt. 16, 8/5 Fasadnaya Street, Lesnoy Gorodok, Moscow Oblast, 140380 Russia

#### **(54) METHOD OF PLASMA GENERATION AND A DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION**

The field of the invention is plasma technology, specifically, means of plasma generation by using external microwave electromagnetic fields. Its purpose is to be used in low-power and easily transported setups generating microwave plasma, which can be used in a wide spectrum of applications, e.g., plasma treatment of material surfaces, ecological removal of hazardous admixtures from industrial and household wastes, medicine and biology, etc. The essence of the invention is that oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the system formed by a source of microwaves (magnetron) (1) and a resonator (3). Antinodal areas of the stabilized standing wave are found, as well as the direction of oscillations of the electric vector in the resonator, which is connected with the discharge chamber (6). Strong coupling between the resonator and the discharge chamber is arranged. The distribution of the electromagnetic field in the discharge chamber is analyzed, and the antinodal areas are fixed. The initiator (4) is placed in an antinodal area of the resonator and the discharge chamber and oriented relative to the oscillations of the electric vector in the resonator. Afterwards, oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the "microwave source – resonator – initiator – discharge chamber" system, and the intensity of the electromagnetic field is increased to a value exceeding the breakdown intensity for the gas filling the discharge chamber. Thus, a discharge is initiated and plasma is generated due to the effect of microwaves. The technical outcome is that stability and steadiness of generation of the discharge is ensured to form a continuous plasma flow in any gas medium.

## PATENT DISCLOSURE

The invention is related to the field of plasma technology, specifically, means of generation of plasma with the use of external microwave electromagnetic fields, and is intended for the use in low-power and easily transported setups generating plasma. Such setups can be used in various fields, e.g. plasma processing of material surfaces, ecological removal of hazardous admixtures from industrial and household wastes, medicine and biology, etc.

An important precondition for efficient application of the microwave discharge plasma in practice is the stability of its generation at the lowest achievable levels of the intensity of the wave's electric field both in the pulsed and continuous generation regimes. No stability in plasma generation makes it nearly impossible to use plasma in technological applications, whereas operations at high levels of electric fields requires the use of high-power, expensive microwave setups, which have reduced operational lives and work, as a rule, in isolated boxes that protect the operators against X-rays and microwaves.

To use these methods, plasmatrones are generally used, which contain a microwave generator and a waveguide to transfer the power to the area where the plasma is generated and maintained [*Powder Metallurgy and Coating Deposition*, Ed. B.S. Mitin, Metallurgy, Moscow, 1987, p. 631; US Patent N 4370539, IPC B 23 K 9/16, NPC 219/121PW, application date 07.10.80, published on 25.10.83; US Patent 5210392, IPC B 23 K 9/00, NPC 219/125.52, application date 07.11.90, published on 11.05.93].

These areas can be a vacuum chamber, a resonator, or just a tube crossing the waveguide.

Such setups require special ways of initiating the plasma discharge, e.g., reducing the gas pressure to the breakdown value, moving the electrodes closer to each other, feeding a spark externally to the area of plasma formation, or short-circuiting the electrodes directly. All these way makes it possible to achieve multiple initiation, but their use results in fast destruction of the electrodes.

The burning of the plasma in such setups is unstable: if it goes extinct, the discharge should be initiated again externally to ignite it.

Moreover, most of such systems are bulky, and their operation requires such instruments as a vacuum system, a power unit to achieve high intensity of microwaves, and means of microwave protection, which complicates their use, especially in such fields as medicine, jewelry manufacture, etc.

There is a known method of plasma generation, when an electromagnetic microwave is used to create an initiated discharge in a gas medium and to generate plasma. Stable generation of plasma in a gas medium affected by an electromagnetic microwave takes place when the intensity of the electric field of the wave exceeds the threshold of the ignition of a self-sustained discharge (*High-Pressure Microwave Discharge in Beams of Electromagnetic Waves*. Coll. papers, Gorky, 1988, p. 141-142).

To realize this method, an initiator is placed in the plasma formation area. The use of the initiator lowers the plasma generation threshold by several times depending on the gas pressure. At the same time, the spatio-temporal stability of microwave discharge reproduction is often rather unsatisfactory. This undesirable property of the initiated discharge is most pronounced at reduced levels of the intensity of the microwaves' electric field and hinders practical use of the discharge plasma with the characteristics in the area of unstable plasma generation.

Another known method of plasma generation is that an initiated discharge generating plasma is created in a gas medium by means of an electromagnetic microwave. After the discharge is

created, the obtained discharge structure is fixed, the recurring element of the structure is singled out and an initiator is placed in the plasma formation area, with its geometric parameters and shape being identical to the recurrent element of discharge structure at the fixation moment.

This method is realized by using a device containing a microwave oscillator, a gas-filled discharge chamber, and an initiator placed in it, whose shape and geometric parameters are chosen identical to the discharge structure elements [RF patent N 2046559, IPC H 05 H 1/46, appl. 30.12.92, publ. 20.10.95. БИ N 29]. This method makes it possible to make the breakdown threshold much lower, but for the pressures in the gas discharge chamber being about the atmospheric one or exceeding it, it is necessary to apply very high intensity of the electric field and, therefore, feed in very strong power to initiate a gas discharge under high pressures.

Besides, it is necessary to change the initiator configuration each time the working gas or its operating pressure are changed, which makes its practical application much more difficult.

The task of this invention is to ensure stability and steadiness of generation of the discharge to form a continuous plasma flow in any gas medium by automatically restoring the plasma initiation cycle at any gas pressure while using low-power sources of microwave radiation.

Following the known method of plasma generation by initiating a discharge in a gas medium by means of an electromagnetic microwave, this task is solved by the use, of a low-power source of microwaves. The intensity of the electromagnetic field of the source is increased using a volume resonator. Strong coupling between the source and the resonator is arranged. Oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the system formed by the source of microwaves and the resonator. Antinodal areas of the stabilized standing wave are found, as well as the direction of oscillations of the electric vector in the resonator, which is connected with the discharge chamber. Strong coupling between the resonator and the discharge chamber is arranged. The distribution of the electromagnetic field in the discharge chamber is analyzed, and the antinodal areas are fixed. The initiator is placed in the antinodal area of the resonator and the discharge chamber, and oriented relative to the oscillations of the electric vector in the resonator. Afterwards, oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the "microwave source – resonator – initiator – discharge chamber" system, and the intensity of the electromagnetic field is increased to a value exceeding the breakdown intensity for the gas filling the discharge chamber. Thus, a discharge is initiated and plasma is generated due to the effect of microwaves.

Along with that, the task is solved by adding a volume resonator to the device, which realizes the above plasma generation method and contains a microwave source, a gas-filled discharge chamber and an initiator installed in the chamber and made of an electric-conducting material. The initiator is installed simultaneously in the cavities of the discharge chamber and the resonator, and one end of the initiator in the discharge chamber is situated in the antinodal area of the standing wave stabilized in the discharge chamber, and the other end is placed in the resonator in the antinodal area of the standing wave stabilized in the resonator. A magnetron is used as a microwave source, with the frequency corresponding to the resonance frequency of the volume resonator. The emitting element of the microwave magnetron is situated in the volume resonator.

An optimal increase in the intensity of the electric field can be achieved when the end of the initiator, which is placed in the resonator, is oriented parallel to the direction of oscillations of the electric vector.

In this case, the initiator can be chosen such that the end of the initiator in the resonator is either connected, or not connected with its current-conducting surface. In the latter case, its diameter is at least twice as long as the diameter of the end of the initiator in the discharge chamber, and its length is chosen from the ratio

$$L = n\lambda/2 + \lambda/4,$$

where  $L$  is the total length of the initiator,  $\lambda$  is the length of the microwave in free space, and  $n = 0, 1, 2, \dots$ .

The initiator may have any form, but for the sake of manufacture simplicity, it can be made rectilinear or curvilinear, e.g., made as an U-shaped coupling loop. In this case, the section of the coupling loop connecting its parallel branches is situated in the antinodal area of the standing wave stabilized in the resonator, and its length is equal to  $\lambda/4$ .

The initiator can be manufactured in the form of two rectilinear sections joined perpendicularly, and the length of its section placed in the resonator parallel to the electric vector is equal to  $\lambda/4$ .

If the device is used as a tool for plasma deposition of coatings on, e.g., surfaces of a cutting tool, the initiator can be made as a pipeline, with its end within the resonator led out of it and connected to the gas-feeding system.

To form a plasma jet, the end of the pipeline-shaped initiator in the discharge chamber can be equipped with a nozzle made of high-melting material, or capped with a tube made of a dielectric material having a high melting temperature and low microwave energy losses, e.g., quartz.

To simplify its structure, the discharge chamber can be made as a cylinder, which is coaxial with the section of the initiator placed in it.

Contrastive analysis showed that the claimed solution differs from the prototype in that oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the system formed by the source of microwaves and the resonator. Antinodal areas of the stabilized standing wave are found, as well as the direction of oscillations of the electric vector in the resonator, which is connected with the discharge chamber. Strong coupling between the resonator and the discharge chamber is arranged. The distribution of the electromagnetic field in the discharge chamber is analyzed, and the antinodal areas are fixed. The initiator is placed in the antinodal area of the resonator and the discharge chamber, and oriented relative to the oscillations of the electric vector in the resonator.

By contrast, in the device a microwave magnetron is used as a microwave source, and the initiator is situated simultaneously in the cavities of the resonator and the discharge chamber, which makes it possible to make a conclusion about the compliance with the novelty criterion.

The essence of the invention is as follows.

As is known, discharge initiation requires a significantly higher intensity of the electric field as compared with the maintenance of the discharge burning (sometimes, by several orders of magnitude), therefore relatively high-power sources of microwaves are generally used to generate plasmas.

If one uses a low-power microwave source, e.g., a microwave magnetron, than at the stage preceding the discharge initiation, one has to raise the intensity to the required level. To do this, the setup has to be supplemented with a storage of microwave energy, which can be a volume resonator. However, in this case, the problem of tuning the resonator and the microwave source to the same resonance frequency arises.

There are known methods of tuning and stabilizing the magnetron frequency with a hollow resonator. In this case, additional resonance states appear in the resonance system of the magnetron for any character of the coupling of the magnetron anode unit with the resonator

[D.V. Samsonov, *Basics of Calculating and Designing Magnetrons*, Sovetskoye Radio, Moscow, 1974, p. 167-194].

In this case, in accordance with the "minimal scattering" principle, the oscillations of the magnetron-resonator system are excited at the frequency, at which the achieved ratio of the stored energy to the total energy of period losses is maximal, i.e., at the frequency, at which the Q-factor of the system is maximal. Since the Q-factor of the inherent resonance system of the magnetron is much lower than the Q-factor of the volume resonator, the oscillations will be excited at the resonance frequency of the system formed by the magnetron and the resonator. In this case, certainly, this frequency should be made close to the operating eigenfrequency of the magnetron. The degree of this "closeness" depends on a specific type of the used magnetron and the degree of its coupling with the resonator.

This means that if the magnetron has strong coupling with the volume resonator and their natural resonance frequencies coincide with the accuracy of the order of several percent (not more than 10%), the oscillations will be excited at the resonance frequency of the system without the use of any mechanical means for frequency adjustment.

To lower the threshold of plasma generation and reduce the power level, an initiator is installed in the plasma formation area. The initiator is used also to ensure strong coupling in the system "microwave magnetron-resonator/discharge chamber". This is achieved by installing it in the cavities of both the resonator and the discharge chamber.

Strong coupling in the system "microwave magnetron-resonator" can be arranged, e.g., by positioning the emitter of the microwave magnetron in the resonator.

This regime of the system operation can be maintained only when a high Q-factor of the entire system (magnetron-volume resonator-entire discharge chamber) is ensured. To do this, one has to eliminate any energy losses in the system (e.g., for outgoing radiation) excluding unavoidable losses due to finite conductivity of the resonator walls at the stage of energy accumulation.

If all these conditions are fulfilled, energy starts to accumulate in the volume resonator, and a standing wave is formed, which has a maximum and a minimum of the electric-field intensity. Their distribution depends on the specific type of the volume resonator (cylindrical, coaxial, rectangular one, etc.) and the type of excited oscillations.

In this case, the intensity of the electric field at the points where the maxima are situated (so called "antinodes") exceeds significantly the intensity of the field developed by the magnetron in the case of free-space radiation. For high-Q-factor resonators, the increase in the field intensity can be very large, about 100 times and more.

In usual schemes of using volume resonators for microwave breakdown, after the breakdown intensity is achieved, a gas discharge begins, which propagates over the entire volume of the resonator.

The position of the initiator in the cavities of the resonator and the discharge chamber makes it possible to avoid radiation from the discharge chamber into the outer space at the pre-discharge stage and ensure strong coupling between the resonator and the discharge chamber, which results in establishment of its own standing wave in the discharge chamber.

Numerous experiments showed that when the end of the initiator situated in the discharge chamber gets into the antinodal area of the standing wave formed in it, the discharge happens near the end of the initiator, i.e., where the inhomogeneity of the field is maximal.



The spatial distribution of the antinodes of the electric field in the discharge chamber is determined by the shape and dimensions of the discharge chamber.

Since the end of the initiator in the resonator is situated in the area of the high-intensity field, it is necessary to take special measures to prevent a discharge near this end of the initiator. To do this, one can, e.g., make the diameter of the initiator end in the resonator at least twice as long as the diameter of the initiator end in the discharge chamber.

A greater length of the diameter makes it possible to reduce the field gradient near the initiator surface and increase proportionally the field intensity required for the gas breakdown in the resonator, i.e. to increase the electric strength of the resonator.

After initiation, the discharge is localized near the end of the initiator and does not propagate to other regions of the discharge chamber or the resonator.

The presence of the initiator and the discharge chamber introduce some changes into the inherent resonance frequency of the "magnetron-volume resonator" system. However, since there is almost no radiation from the system, the Q-factor of the system formed by the magnetron, resonator, initiator, and the discharge chamber remains high.

The microwave magnetron "self-tunes" to the frequency corresponding to the resonance frequency of the system "magnetron-resonator-initiator-discharge chamber". Since there is strong coupling between the microwave magnetron and the resonator on the one hand, and between the resonator and the discharge chamber, on the other hand, the radiated energy is transmitted efficiently into the area of plasma burning.

After the discharge is excited, the formed plasma starts absorbing energy fast, which results in a sharp drop in the Q-factor of the entire system. Oscillations at its working eigenfrequency become more expedient for the magnetron energy-wise, the magnetron becomes tuned to this frequency, and further, the energy is radiated at this frequency.

In this case, if the discharge fails due to some reason, the Q-factor of the whole system will be restored after a very short time. The magnetron will become retuned, new accumulation of the energy will occur, and the discharge will appear at once. The time gap for discharge restoration is so short ( $\sim 10^{-6}$  s) that it does not affect the stability of operation of the system as a whole. The initiation of a new discharge occurs almost automatically, which makes it possible to obtain a stable self-initiating plasma discharge. It can also be obtained in air under the atmospheric pressure and does require a high-power microwave generator.

To localize the discharge in the volume out of the resonator, which is the gas-filled discharge chamber, an initiator is situated in the resonator, in the antinodal area of the electric field, parallel to the electric vector. The second end of the initiator is led to the discharge chamber.

This position of the initiator makes it possible to lower the breakdown threshold and achieve initiation of the discharge near the end of the initiator in the discharge chamber.

The operation of the device, which implements the method, is explained in the drawings, where Fig. 1 shows the version of the device, in which the initiator is a rectilinear conductor, Fig. 2 shows the version, in which the initiator is a U-shaped coupling loop, Fig. 3 shows the version, in which the initiator is bent in the form of two perpendicularly joined rectilinear pieces, Fig. 4 shows the version, in which the discharge chamber is installed coaxially with the end of the initiator in it, and Fig. 5 shows the version, in which the end of the initiator in the resonator is not connected with its current-conducting surface, and its diameter is at least twice as long as the diameter of the end of the initiator in the discharge chamber.

The device contains microwave magnetron 1 with its emitter 2 situated in the cavity of volume resonator 3. In the same cavity, initiator 4 is installed. One end (5) of the initiator is in discharge chamber 6 and is capped with nozzle 7 and tube 8 made of a dielectric material having a high melting temperature and low microwave energy losses. The other end of the resonator (9) is led out of the resonator cavity and connected to the gas-feeding system.  $d_2$  and  $d_1$  are the diameters of the initiator ends situated in resonator 3 and discharge chamber 6, respectively (Fig. 5).

#### Variants of invention realization

The device operates as follows.

After high-voltage is fed to magnetron 1, the frequency corresponding to the resonance frequency of the system "magnetron 1 – resonator 3 – initiator 4 – discharge chamber 6" stabilizes during a very short time ( $\sim 10^{-8}$  s).

Then, energy is accumulated during  $\sim 10^{-6}$  s until the threshold intensity is achieved. Near end 5 of initiator 4 in discharge chamber 6, a discharge is ignited. The microwave energy emitted by radiation source 2 of magnetron 1 is absorbed in the formed plasma. Nozzle 7 and dielectric tube 8 together with the gas feeding system form a plasma jet. If the discharge fails, the initiation process repeats automatically.

Since the initiator acts simultaneously as an element ensuring strong coupling between the resonator and the discharge chamber, its dimensions should ensure optimal conditions for energy transfer to the discharge burning area after initiation. Numerous experiments showed that the best results are achieved when the initiator length is chosen basing on the ratio

$$L = n\lambda/2 + \lambda/4 \quad (1),$$

where  $L$  is the total length of the initiator,  $\lambda$  is the length of the microwave in free space, and  $n = 0, 1, 2, \dots$

In this case, the initiator can be made as a rectilinear conductor oriented parallel to the electric field vector.

Since the disposition of the antinodes of the electric field in the discharge chamber depends on the shape and dimensions of the discharge chamber and in the general case does not coincide with the position of the initiator end, it is necessary to adjust the length of the initiator for an arbitrarily shaped discharge chamber. For a rectilinear initiator, this can contradict the requirement of the optimal length  $L$ .

The best variant is one where the initiator is made as an U-shaped coupling loop or bent in the form of two joint perpendicular rectilinear pieces. In this case, the length of its section set in the resonator parallel to the electric vector is equal to  $\lambda/4$ .

The optimal conditions for the energy transfer are achieved when the length of the initiator section being at the antinode of the electric field of the resonator parallel to the electric field vector is  $\lambda/4$ .

When the device is used for ionization, heating, and outputting a plasma flow in the form of a plasma jet, a metal initiator can be made as a pipeline. In this case, its end connected electrically with the surface of the resonator is led through the resonator wall and connected to the gas-feeding system.

To set the speed and shape of the plasma jet, a nozzle made of a heat-resisting material can be installed on the initiator end in the discharge chamber. At the same time, it prevents the destruction of the initiator end by the formed high-temperature plasma.

In order to form the plasma jet, the initiator end can be capped with a tube of high-melting dielectric material having low microwave losses, e.g., quartz. Such a tube can be set on the initiator end even in the version with the nozzle.

The problem of thermal loads, which are produced by the plasma jet, on the walls of the dielectric tube can be solved using standard ways, e.g., by warping the plasma jet around its axis, blowing off the tube externally, etc.

#### Industrial application

In the cylindrical resonators, which are used generally and excited at the TM<sub>010</sub> mode, the intensity of the electric field in the center of the resonator (see A. McDonald, *Microwave Breakdown in Gases* (in Russian), Mir, Moscow, 1969, p. 167) is

$$E_0 = \sqrt{P_0 Q / \eta \omega_0'} \quad (2),$$

where  $P_0$  is the power of the magnetron radiation,  $Q$  is the resonator Q-factor,  $\omega_0'$  is the angular velocity of the microwave radiation, and

$$\eta = 0.27 \cdot \epsilon_0 \cdot V, \quad (3)$$

where  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m is the dielectric permittivity in vacuum, and  $V$  is the volume of the resonator, which is usually chosen to equal  $V \sim \lambda^3$ , where  $\lambda$  is the length of the wave of microwave radiation in free space.

Using formula (2) in calculations, one can select a volume resonator with a relatively low Q-factor ( $Q$ ) while ensuring relatively high intensity in the center of the resonator.

For example, for  $P_0 = 1$  kW,  $\omega_0'/2\pi = 2.45$  GHz,  $V = 1$  litre, and  $Q = 10^3$ , the intensity  $E_0$  of the electric field is about 160 kV/cm. To compare, the breakthrough intensity for air under the atmospheric pressure is about 30 kV/cm.

#### Example of actual application

A magnetron with a power supply from a consumer microwave oven was used. It had the power

$P = 800$  W and the frequency  $f = \omega_0'/2\pi = 2.45$  GHz. This made it possible to use a resonator made of, e.g., copper with its volume  $V = 0.7$  litre for  $\lambda = 12$  cm.

The discharge chamber was made as a cylinder coaxial with the end of the initiator situated in it. The initiator end was capped with a molybdenum nozzle and a dielectric quartz tube. The operating gas was air under the atmospheric pressure.

The temperature of the plasma jet formed in this configuration reached 4500°C. No initiator erosion was observed for two hours of the device operation.

A feature of the device is high stability of its operation. If the plasma is quenched, the discharge is initiated automatically with a small power consumption. The device can be fed by the ordinary consumer electric mains.

Other features of the device is its small size and simplicity of its design, since it contains no mechanically moving details.

All this makes it possible to implement the method using this device in many spheres, e.g. for cutting and welding of any metals (even tungsten) and for deposition of coatings of heat-resisting materials. Small dimensions of the device allow using it in such fields as medicine, dentistry, and jewelry.

## FORMULA OF INVENTION

1. Method of plasma generation by initiating a discharge in a gas medium by means of an electromagnetic microwave, which differs in that a low-power source of microwaves is used. The intensity of the electromagnetic field of the source is increased using a volume resonator. Strong coupling between the source and the resonator is arranged. Oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the system formed by the source of microwaves and the resonator. Antinodal areas of the stabilized standing wave are found, as well as the direction of oscillations of the electric vector in the resonator, which is connected with the discharge chamber. Strong coupling between the resonator and the discharge chamber is arranged. The distribution of the electromagnetic field in the discharge chamber is analyzed, and the antinodal areas are fixed. The initiator is placed in the antinodal area of the resonator and the discharge chamber, and oriented relative to the oscillations of the electric vector in the resonator. Afterwards, oscillations are excited at the frequency corresponding to the resonance frequency of the "microwave source – resonator – initiator – discharge chamber" system, and the intensity of the electromagnetic field is increased to a value exceeding the breakdown intensity for the gas filling the discharge chamber. Thus, a discharge is initiated and plasma is generated due to the effect of microwaves.
2. Device to realize the method of plasma generation following Par. 1, which contains a microwave source, a gas-filled discharge chamber, and an initiator installed in the chamber and made of a current-conducting material. The device differs in that it is supplemented with a volume resonator, and the initiator is installed simultaneously in the cavities of the discharge chamber and the resonator. In this case, the end of the initiator in the discharge chamber is situated in the antinodal area of the standing wave stabilized in the chamber, and the other end is situated in the resonator, in the antinodal area of the standing wave stabilized in it. The microwave source is a microwave magnetron with its operating frequency corresponding to the resonance frequency of the volume resonator. The emitting element of the microwave magnetron is situated within the volume resonator.
3. Device following Par. 2, which differs in that the end of the initiator in the resonator is electrically connected with the conducting surface of the resonator.
4. Device following Par. 3, which differs in that the end on the initiator in the resonator is not connected with the conducting surface of the resonator, and its diameter is at least twice as long as the diameter of the initiator end in the discharge chamber.
5. Device following any of Pars. 2 through 4, which differs in that the length of the resonator is chosen basing on the relationship  $L = n\lambda/2 + \lambda/4$ , where  $L$  is the total length of the resonator,  $\lambda$  is the length of the microwave in free space, and  $n = 0, 1, 2, \dots$ .
6. Device following any of Pars. 2 through 5, which differs in that the initiator is made rectilinear.
7. Device following any of Pars. 2 through 5, which differs in that the initiator is made curvilinear.

8. Device following any of Pars. 2 through 5 and 7, which differs in that the initiator is made as a U-shaped coupling loop, the section of the coupling loop connecting its parallel branches is situated in the antinodal area of the standing wave stabilized in the resonator, and the length of this section is equal to  $\lambda/4$ .
9. Device following any of Pars. 2 though 5 and 7, which differs in that the initiator is bent as two rectilinear sections joint perpendicularly, and the length of the section situated in the resonator parallel to the electric vector is equal to  $\lambda/4$ .
10. Device following any of Pars. 2 through 9, which differs in that the initiator is made as a pipe and the end in the resonator is led out of it and connected to the gas-feeding system.
11. Device following Par. 10, which differs in that the end of the initiator in the discharge chamber is equipped with a nozzle made of a heat-resistant material.
12. Device following Pars. 10 or 11, which differs in that the end of the initiator in the discharge chamber is capped with a pipe made of a dielectric material having a high melting temperature and low microwave energy losses.
13. Device following Par. 12, which differs in that the pipe fit on the initiator end in the discharge chamber is made of quartz.
14. Device following any of Pars. 2 through 12, which differs in that the discharge chamber is made as a cylinder coaxial with the section of the initiator situated in it.

Priority of paragraphs:

25.05.99, for Pars. 1, 2, 4, and 7;

07.04.99, for Pars. 3, 5, 6, 8–14.

## **PATENT NOTIFICATIONS**

Legal-status change code: MM4A – Previous cessation of RF patents due to a non-payment of patent maintenance fees at a set date

Date of bulletin publication: 2002.12.10

Bulletin number: 34/2002

Date of patent termination: 2001.05.26

## **FIGURES**

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5